Marzo del 2007

Manual de Usuario
Modelo Centroamericano de Biogás

Versión 1.0

Preparado en nombre de:

Victoria Ludwig
Programa Landfill Methane Outreach
Agencia para la Protección del Ambiente (U.S. EPA)
Washington, DC

Preparado por:

G. Alex Stege
SCS Engineers
Phoenix, AZ 85008
EPA Contract 68-W-00-110
Task Order 11

Dana Murray, PE
Administrador del Proyecto
SCS Engineers
Reston, VA 20190

LIMITACIONES DE RESPONSABILIDAD

Este manual para el usuario fue preparado específicamente para Centroamérica en nombre del Programa Landfill Methane Outreach, la Agencia para la Protección del Ambiente (U. S. EPA) y la Agencia para el Desarrollo Internacional (USAID). Los métodos contenidos en este manual esta basados en criterios profesionales de ingeniería y representan los estándares de cuidado que se ejercen por los profesionistas con experiencia en el campo de las proyecciones de biogás. La U. S. EPA y SCS Engineers no garantiza la cantidad de biogás disponible y ninguna otra garantía expresada o implícita. Ningún individuo es beneficiario único del producto, su contenido o la información incluida en él. El uso de este reporte será a su propio riesgo. La U. S. EPA y SCS Engineers no asume ninguna responsabilidad por la exactitud de la información obtenida, recolectada o proveída por otras personas.

RESUMEN

Este documento es el manual para el usuario del Modelo Centroamericano de Biogás Versión 1.0 (modelo), utilizado para la estimación de biogás producido en rellenos sanitarios municipales en Centroamérica. Este modelo fue desarrollado por SCS Engineers bajo un contrato con el programa Landfill Methane Outreach (LMOP) de la U. S. EPA. El Modelo Centroamericano de Biogás puede ser utilizado para estimar generación y recuperación de biogás en rellenos sanitarios centroamericanos que cuenten o planeen tener un sistema de recolección de biogás.

El Modelo Centroamericano de Biogás está elaborado en una hoja de cálculo en Excel y está basado en una ecuación de degradación de primer orden. Este modelo requiere que el usuario alimente datos específicos tales como el año de apertura, año de clausura, índices de disposición anual, precipitación promedio anual y eficiencia del sistema de recolección. El modelo provee automáticamente valores sobre la composición de residuos y otras variables (k y L_0) para cada país. Estos valores fueron desarrollados usando datos sobre el clima, características de los residuos y practicas de manejo de residuos solidos en Centroamérica y los posibles efectos que estas condiciones puedan tener sobre las cantidades e índices de generación de biogás. Índice reales de recuperación de biogás de dos rellenos en Centroamérica fueron evaluados pero los datos no fueron suficientes para la calibración del modelo. El modelo utiliza la eficiencia de recolección para estimar la recuperación de biogás basado en las proyecciones calculadas. Este manual incluye instrucciones sobre como evaluar la eficiencia de recolección en el lugar.

El Modelo Centroamericano de Biogás fue desarrollado con el propósito de proveer proyecciones acertadas y conservativas para la generación y recuperación de biogás. Para el desarrollo de este modelo, se evaluaron otros modelos incluyendo el Modelo Mexicano de Biogás, el Método AM0025 v.3 (Marzo del 2006) del Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL) y el 2006 Waste Model del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (IPCC). El Modelo Centroamericano de Biogás incorpora conceptos de cada uno de los modelos para mejor reflejar las condiciones verdaderas en los sitios de disposición final en Centroamérica. Una comparación de los resultados del modelo indica que el Modelo Centroamericano resulta en estimados de generación de biogás de medio rango a los resultados del Método MDL y el Modelo IPCC.

INDICE

Sección **Página**

Agradecimientos i
Resumen ii
Lista de Figuras iii
Lista de Tablas v
Glosario iv

1.0 Introducción 1-1

1.1 Generación de Biogás 1-2

1.1.1 Índice de Generación de Biogás (k) 1-3
1.1.2 Generación Potencial de Metano (L_0) 1-5

1.2 Recuperación de Biogás 1-7

1.3 El Modelo 1-7

2.0 Estimación de Generación y Recuperación de Biogás 2-1

2.1 Alimentación del Modelo 2-1

2.1.1. Estimación de la eficiencia de Sistema de Recuperación 2-4

2.2 Resultados del Modelo / Tabla 2-7
2.3 Resultados del Modelo / Gráfica 2-8

3.0 Referencias 3-1

Figura

1 Alimentación del Modelo 2-2
2 Alimentación del Modelo (Continuación) 2-4
3 Ejemplo: Hoja de Resultados / Tabla 2-8
4 Ejemplo: Hoja de Resultados / Gráfica 2-10

Tabla **Página**

1 Indice de Generacion de Biogas (k) - Clima Humedo 1-4
(Precipitacion >= 1000mm/ año)

2 Indice de Generacion de Biogas (k) - Clima Moderado 1-4
(Precipitacion =750-999 mm/año)

3 Indice de Generacion de Biogas (k) - Clima Seco 1-4
(Precipitacion = 500-749 mm/año)

4 Generación Potencial de Metano (L_0) 1-4

5 Factor de Correccion de Metano (MCF) 1-6

6 Eficiencia de Recolección 2-5

GLOSARIO

Término	Definición
Eficiencia del Sistema de Recolección	El porcentaje de la generación del biogás que se estima que puede ser recuperado por el sistema de recolección.
Cobertura del Sistema de Recolección	El porcentaje estimado de la masa de residuos en el relleno sanitario que esta bajo la influencia de los pozos de extracción de biogás. La cobertura del sistema describe la fracción de gas recuperable y puede alcanzar el 100% si se cuenta con un sistema de recolección excelente (al contrario de la eficiencia del sistema de recolección que siempre esta por debajo del 100%).
Capacidad del Relleno Sanitario	La cantidad total de residuos que pueden ser depositados en el relleno sanitario.
Biogás	Biogás es el producto de la degradación de los residuos depositados en el relleno sanitario y consiste principalmente de metano y dióxido de carbono, con cantidades muy pequeñas de otros compuestos orgánicos y contaminantes atmosféricos.
Índice de Generación de Metano (k)	k es la constante que determina el índice de generación de biogás estimado. El modelo de degradación de primer orden asume que los valores de k antes y después de la generación máxima de biogás son iguales. El valor de k esta en función del contenido de humedad y la disponibilidad de nutrientes, pH, y temperatura. (Unidad = 1/año)
Generación Potencial de Metano (L_0)	L_0 es la constante del modelo que representa la capacidad potencial para generar metano (componente principal del biogás) del relleno sanitario. L_0 depende de la cantidad de celulosa disponible en los residuos. (Unidad = m^3/Mg)
Año de Clausura	El año en el que el relleno sanitario espera terminar las actividades de disposición.

1.0 INTRODUCCION

El Modelo Centroamericano de Biogás (modelo) provee una herramienta automática para la estimación de la generación y recuperación de biogás en rellenos sanitarios municipales en Belice, Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua y Panamá. Este manual provee una introducción al modelo e instrucciones paso-a-paso para el uso del modelo.

El principal propósito del Modelo Centroamericano de Biogás es proveer a propietarios u operadores de rellenos sanitarios con una herramienta para evaluar la factibilidad y beneficios de recuperar y usar el biogás generado. Para lograr este propósito, este modelo provee proyecciones de generación y recuperación de biogás. Las proyecciones de recuperación de biogás son obtenidas multiplicando las proyecciones de generación por la eficiencia del sistema de recolección.

El biogás es generado por la descomposición de residuos en un relleno sanitario, y puede ser recuperado bajo la operación de un sistema de recuperación de biogás construido en el mismo relleno sanitario. La siguiente información es necesaria para estimar la generación y recuperación del biogás en un relleno sanitario. (Ver Glosario para mayor información):

- Capacidad de diseño del relleno sanitario
- La cantidad de residuos depositados en el relleno sanitario, o el índice de aceptación anual estimado
- El índice de generación de metano (k)
- La generación potencial de metano (L_0)
- La eficiencia del sistema de recolección de biogás; y
- Los años de operación a la fecha y los años que se planea operar.

El método utiliza una ecuación de degradación de primer orden que asume que la generación de biogás llega a su máximo después de un periodo de tiempo antes de la generación de metano. El modelo asume que el período es de seis meses desde la colocación de los residuos y el comienzo de la generación de biogás. El modelo asume que por cada unidad de residuos, después de seis meses la generación disminuye exponencialmente mientras la fracción orgánica de los residuos es consumida.

Para sitios donde se conocen los índices de disposición año con año, el modelo estima la generación de biogás en un año dado usando la siguiente ecuación utilizada por el Modelo Landfill Gas Emissions (LandGEM) de la U.S. EPA versión 3.02 (EPA 2005):

$$Q_M = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=0.1}^{1} 2\, k\, L_o\, (M_i/10)\, (e^{-kt_{ij}})$$

Donde:
- Q_M = Generación máxima anticipada de biogás (m^3/año);
- i = Incremento de 1 año
- n = (año del calculo) – (año inicial en que se acepto residuos)
- j = Incremento de 0.1 años
- k = índice de generación de metano (1/año);
- L_o = Generación Potencial de metano (m^3/Mg);
- M_i = masa de residuos depositados en el año i^{th} (Mg);
- t_{ij} = Edad de la sección j^{th} de masa de residuos depositados en el año i^{th} (años decimales).

La ecuación anterior estima la generación de biogás usando cantidades de residuos dispuestos acumulados a través de un año. Proyecciones para años múltiples son desarrolladas variando la proyección del anual y luego iterando la ecuación. El año de generación máxima normalmente ocurre en el año de clausura o el año siguiente (dependiendo del índice de disposición en los años finales).

Con la excepción de los valores de k y L_0, el modelo centroamericano de biogás requiere datos específicos del relleno en cuestión para producir las proyecciones de generación. El modelo provee los valores de k y L_0. Los valores son calculados basándose en la información recolectada sobre el clima y composición de residuos de rellenos sanitarios representativos y ciudades en Centroamérica. Los valores de k y L_0 varían dependiendo del país, composición de residuos y la precipitación anual y podrán ser usados para producir proyecciones de generación de biogás en rellenos sanitarios localizados en uno de los siete países de Centroamérica.

La EPA reconoce que es difícil modelar la generación y recuperación de biogás en forma exacta debido a las limitaciones en la información disponible para alimentar el modelo. Sin embargo, con la construcción y operación de nuevos rellenos sanitarios, la disponibilidad de nueva información hará posible la calibración del modelo y el desarrollo de unos valores de k y L_0 mejores.

Cualquier pregunta y/o comentario referente al Modelo Centroamericano de Biogás deberán ser dirigidas a Victoria Ludwig del Programa LMOP de la U. S. EPA vía telefónica al (202) 343-9291, o vía correo electrónico a Ludwig.Victoria@epamail.epa.gov.

1.1 Generación de Biogás

El Modelo Centroamericano de Biogás estima generación de biogás producida por la degradación de desechos en rellenos sanitarios. La descomposición anaeróbica de los desechos en los rellenos sanitarios genera biogás. El modelo asume que la composición del biogás es aproximadamente 50 por ciento metano (CH_4) y 50 por ciento otros gases entre ellos: dióxido de carbono (CO_2) y trazos de otros componentes.

Este modelo utiliza una ecuación de degradación de primer grado y estima volumen de generación de biogás en metros cúbicos por hora (m^3/hr) y pies cúbicos por minuto (cfm). También estima el contenido de energía en el biogás generado en millones de unidades de calor británicas (mmBtu/hr) y la capacidad máxima de una planta de energía utilizando biogás como combustible en megavatio (MW). La generación de biogás es estimada multiplicando la generación de metano por dos (Se asume que el biogás esta compuesto de 50% metano y 50% dióxido de carbono). La generación de metano es estimada usando dos parámetros: (1) L_0 o Generación Potencial de Metano y (2) k o Índice de Generación de Metano. Se asume que el índice de generación de metano esta a su máximo al momento de clausura o al momento de colocar los residuos finales en el relleno sanitario. A pesar de que el modelo permite la alimentación de los valores de L_0 y k derivados con información propia del relleno sanitario es recomendado que se utilicen los valores que el modelo calcula automáticamente.[1]

1.1.1 Índice de Generación de Biogás (k)

El índice de generación de metano, k, determina el índice de generación de metano producido por la degradación de los desechos en el relleno sanitario. Las unidades de k son $año^{-1}$, y describe la generación de biogás producida por la degradación de los residuos dispuestos en un relleno sanitario en un año. Conforme el valor de k incrementa, la generación de metano en un relleno sanitario también incrementa (siempre y cuando el relleno sanitario siga recibiendo residuos) y luego disminuye (después que el relleno sanitario es clausurado) a través del tiempo. El valor de k esta en función de los siguientes factores: (1) contenido de humedad en los residuos, (2) la disponibilidad de nutrientes para las bacterias generadoras de metano, (3) pH, y (4) temperatura.

Los residuos tienen diferentes valores de k dado a las diferencias en los índices de decaimiento. Residuos alimenticios se descomponen más rápido que el papel y la madera. El Modelo Centroamericano de Biogás asigna dos diferentes categorías de valores de k para materia orgánica dependiendo del decaimiento (rápido o lento). Residuos de decaimiento rápido incluye comida y algunos desechos de jardinería (“residuos verdes). Residuos de decaimiento lento incluye todos los demás residuos orgánicos como residuos de jardinería, papel, textiles, caucho, cuero y huesos. La proporción de valores de k para residuos de decaimiento rápido versus y los residuos de decaimiento lento depende de la composición de los desechos ya que existen distintos materiales en cada categoría.

Los valores de k dependen del clima especialmente de la precipitación. Ya que la mayor parte de Centroamérica recibe grandes cantidades de precipitación, los rellenos exhiben condiciones húmedas que maximizan los índices de decaimiento y valores de k. El Modelo Centroamericano de Biogás no considera diferencias de valores de k en lugares que reciben sobre 1,000 mm de precipitación al año. Para aquellos lugares que reciben menos de 1,000 mm de precipitación al año, el modelo de biogás asignar los valores de k correspondiente al clima local.

[1] Si existen datos reales de recuperación de biogás, se puede calibrar el modelo para desarrollar valores de L_0 y k específicos a un relleno con sistema activo de recolección.

Al menos que existen valores de k o datos sobre la composición de residuos específicos al relleno, el Modelo Centroamericano de Biogás utiliza los valores automáticos ya incluidos. Para cada uno de los siete países, se calcularon valores de k para decaimiento rápido y decaimiento lento. El valor de k de 0.23 por año se utiliza como el valor k de decaimiento rápido, igual que le Método MDL AM0025 (UNFCCC 2006). Los valores k de decaimiento lento dependen de la composición de residuos. Las Tablas 1 a 3 señalan los valores k automáticos utilizados por el modelo, dependiendo de la cantidad de precipitación que recibe el relleno.

TABLA 1: INDICE DE GENERACION DE BIOGAS (k) - CLIMA HUMEDO (Precipitación >= 1000mm/ año)

País	k rápida (por año)	k lenta (por año)
Belice	0.23	0.033
Costa Rica	0.23	0.028
El Salvador	0.23	0.027
Guatemala	0.23	0.030
Honduras	0.23	0.030
Nicaragua	0.23	0.025
Panamá	0.23	0.029

TABLA 2: INDICE DE GENERACION DE BIOGAS (k) - CLIMA MODERADO (Precipitación = 750-999 mm/ año)

País	k rápida (por año)	k lenta (por año)
Belice	0.20	0.029
Costa Rica	0.20	0.024
El Salvador	0.20	0.023
Guatemala	0.20	0.026
Honduras	0.20	0.026
Nicaragua	0.20	0.022
Panamá	0.20	0.025

TABLA 3: INDICE DE GENERACION DE BIOGAS (k) - CLIMA SECO
(Precipitación = 500-749 mm/ año)

País	k rápida (por año)	k lenta (por año)
Belice	0.18	0.026
Costa Rica	0.18	0.022
El Salvador	0.18	0.021
Guatemala	0.18	0.024
Honduras	0.18	0.023
Nicaragua	0.18	0.020
Panamá	0.18	0.022

1.1.2 Generación Potencial de Metano (L_0)

El valor de la generación potencial de metano en los residuos (L_0) solo depende en el tipo de residuos presente en el relleno sanitario con excepción de los climas seco donde la falta de humedad limite la generación de metano. La falta de humedad o muy poco humedad provoca la inhibición de las bacterias generadoras de metano. Conforme el contenido de celulosa en los residuos aumenta, el valor de L_0 también aumenta. Las unidades de L_0 están en metros cúbicos por tonelada de residuos, lo cual significa que el valor de L_0 describe la cantidad de gas metano producida por tonelada de residuos según se descomponen la materia. Los valores teóricos L_0 varían entre 6.2 y 270 m^3/Mg de residuos (EPA, 1991). Al menos que se cuente con valores específicos de L_0 para el relleno sanitario en cuestión, los valores de L_0 serán calculados automáticamente por el modelo. El modelo utiliza los datos sobre la composición de residuos para calcular los valores L_0 de cada país incluyendo un valor L_0 total, un L_0 para el decaimiento rápido y un L_0 para el decaimiento lento. Los siguientes valores de L_0 serán usados por el modelo para cada país:

TABLA 4: GENERACIÓN POTENCIAL DE METANO (L_0)

País	L_0 total (m^3/Mg)	L_0 de decaimiento rápido (m^3/Mg)	L_0 de decaimiento lento (m^3/Mg)
Belice	78	71	199
Costa Rica	96	70	200
El Salvador	91	68	189
Guatemala	89	71	198
Honduras	70	68	209
Nicaragua	82	72	183
Panamá	101	68	207

1.1.2.1 Factor de Corrección de Metano

El Factor de Corrección de Metano (MCF) es un ajuste final a los estimados del modelo que considera el grado de descomposición anaeróbicos de los residuos. El MCF cambia dependiendo de la profundidad y tipo de relleno sanitario y se define según el manejo del lugar. En rellenos controlados, se asume que toda la descomposición de los residuos será anaeróbica (MCF de 1). En rellenos semi-controlados o botaderos donde las condiciones son menos propicias al decaimiento anaeróbico, el MCF debe ser menos para reflejar los condiciones aeróbicas del lugar. La Tabla 5 presenta los valores MCF recomendados.

TABLA 5: FACTOR DE CORRECCION DE METANO (MCF)

Manejo de Lugar	Profundidad < 5 m	Profundidad > = 5m
Botadero	0.4	0.8
Relleno controlado	0.8	1.0
Relleno semi-aeróbico	0.3	0.5
Desconocido	0.4	0.8

El decaimiento anaeróbico es mayor a profundidades mayores de cinco metros; en lugares llanos, el decaimiento es principalmente aeróbico. Un relleno controlado se define como un lugar con disposición controlado de residuos (residuos depositados en las áreas específicas, medidas de control para pepenadores e incendios) y una o más de las siguientes: cubierta, compactación o nivelación de residuos (IPCC 2006). El relleno semi-aeróbico tiene disposición controlada de residuos y la siguiente infraestructura para introducir aire a la capa de residuos: cubierta permeable, sistema de drenaje de lixiviados, almacenamiento de agua y un sistema de ventilación (IPCC 2006).

1.2 Recuperación de Biogás

El biogás generado en rellenos sanitarios puede ser capturado utilizando un sistema de recolección de biogás que usualmente quema el gas por medio de quemadores. Alternativamente el gas recuperado puede usarse de diferentes maneras. Por ejemplo: Producción de energía eléctrica a través del uso de generadores de combustión interna, turbinas, o microturbinas o puede utilizarse como combustible en calentadores de agua u otras instalaciones.

Además de los beneficios energéticos en el uso del biogás, la recolección y control del biogás generado ayuda a reducir emisiones atmosféricas contaminantes. La U. S. EPA ha determinado que las emisiones de biogás provenientes de los rellenos sanitarios causan o contribuyen significantemente a la anticipada contaminación atmosférica que puede causar problemas de salud y bienestar. Algunas de estas emisiones son consideradas carcinogénicas o con la posibilidad de que produzcan cáncer y otros efectos adversos a la salud. Algunas de las preocupaciones en el bienestar público son el mal olor y la posible migración del metano, en el relleno sanitario y sus alrededores, esto podría contribuir a explosiones o fuegos. También, el

metano emitido por los rellenos sanitarios es considerado un gas invernadero que contribuye al problema del cambio climático global.

El principal propósito del Modelo Centroamericano de Biogás es proveer a propietarios u operadores de rellenos sanitarios con una herramienta para evaluar la factibilidad y beneficios de recuperar y usar el biogás generado. Para lograr este propósito, el modelo provee proyecciones de generación y recuperación de biogás. Las proyecciones de recuperación de biogás son obtenidas multiplicando las proyecciones de generación por la eficiencia del sistema de recolección.

1.3 El Modelo

El Modelo Centroamericano de Biogás puede ser operado en los siguientes sistemas operativos: Windows 98®, Windows 2000®, Windows XP®, o Vista. El programa es una hoja de cálculo en Microsoft Excel®, la cual permite al usuario considerable control en los cálculos y la apariencia de los resultados. El programa Excel® deberá estar abierto antes de poder utilizar el modelo. Una vez que Excel este listo, abrir el archivo llamado "Modelo Centroamericano de Biogás V1.xls" siguiendo el siguiente procedimiento:

Seleccionar "File o Archivo" del menú principal; y luego "open o abrir," y finalmente "open o abrir" cuando el archivo correcto ha sido seleccionado. El modelo tiene siete hojas que pueden ser vistas seleccionando el tabulador en la parte inferior correspondiente a la página que se quiere ver. Las siete páginas son las siguientes:

"Hoja de Alimentación" es una hoja de alimentación;
"Composición de Residuos" es una hoja de alimentación
"Resultados-Tabla" es la hoja de resultados en forma tabular;
"Resultados-Gráfica" es la hoja de resultados en forma gráfica, y
"amounts- NO CAMBIOS", "calcs1- NO CAMBIOS", "calcs2- NO CAMBIOS" son las hojas que el modelo utiliza para hacer los cálculos.

Cuando se utilice el modelo, la mayor parte de la alimentación y edición tomará lugar en la Hoja de Alimentación. Algunas ediciones serán necesarias en las hojas de resultados. También, algunas celdas en la Hoja de Composición de Residuos permiten que el usuario alimente datos de composición particulares al lugar si están disponibles. Las demás celdas de la Hoja de Composición de Residuos y todas las Hojas de Cálculo no deberán sufrir ningún tipo de cambios, y esta protegida con una clave para prevenirlos.

2.0 ESTIMACION DE GENERACION Y RECUPERACION DE BIOGAS

2.1 Alimentación del Modelo

Con excepción de los datos de composición de residuos, la alimentación del modelo se efectuará en la Hoja de Alimentación. Las celdas en texto rojo requieren ser alimentadas con valores específicos. Las celdas en amarillo no deberán ser modificadas. Los siguientes valores deberán ser alimentados para obtener resultados aceptables:

Paso 1: Nombre y lugar del relleno sanitario (Celda A4). La información de esta celda aparecerá automáticamente en el encabezado de la hoja de resultados en forma tabular.

Paso 2: Seleccione el país de relleno (Celda B5). El país seleccionado le indicara el modelo que datos de composición de residuos de la Hoja de Composición de Residuos a utilizar en los cálculos.

Paso 3: Selección 'Sí' para señalar que existen datos específicos al relleno sobre la composición o 'No' para que el modelo utiliza los valores de composición automáticos (Celda B6). Si selecciono 'Sí', el modelo utilizara los porcentajes alimentados en la Hoja de Composición de Residuos (Celdas B4 a la B10 y B14 a la B17 de la hoja).

Paso 4: El año de apertura (Celda B7). Este valor será usado para establecer los años de disposición en las hojas de resultados.

Paso 5: Crecimiento estimado de disposición anual (%) (Celda B8 – para mas detalle ver Figura 1) Este porcentaje será alimentado en la hoja de resultados.

Paso 6: Precipitación promedio anual en mm/año en la región donde se ubica el relleno sanitario (Celda B9 – para más detalle ver Figura 1). Este valor puede ser obtenido investigando datos de precipitación del pueblo o cuidad más cercana al relleno sanitario o en el siguiente sitio web: www.worldclimate.com. Este valor será usado para seleccionar automáticamente los valores de k si el lugar recibe menos de 1,000 mm/año de precipitación.

Paso 7: Profundidad de las áreas con depósitos del relleno. (Celda B10). Este valor será utilizado para calcular el Factor de Corrección de Metano (MCF)

Paso 8: Tipo de Relleno según las definiciones basadas en el diseño y manejo del lugar (Celda B11). Instrucciones en la Celda C11 tiene un listado de los números para utilizarse según el tipo de lugar (Vea la Tabla 5 para mas detalles). La información será utilizada para calcular el Factor de Corrección de Metano.

FIGURA 1. HOJA DE ALIMENTACION

	A	B	C
1	**LMOP MODEL DE BIOGAS DE CENTROAMERICA v.1 MARZO 2007**		
3	PROYECCIONES DE GENERACION Y RECUPERACION DE BIOGAS		
4	NOMBRE DEL RELLENO, CIUDAD, PAIS		
5	**País**	**El Salvador**	
6	**¿Existen Datos de Composicion de Residuos especificos al Lugar?**	**No**	
7	**Año de Apertura:**	**1978**	
8	**Crecimiento estimado de disposicion anual:**	**2.0%**	
9	**Precipitación Promedio Anual:**	**1,200**	
10	**Profundidad promedio del relleno:**	**20.0**	
11	**Diseño y operacion del lugar**	**2**	
12	**Contenido de Metano en el Biogás:**	**50%**	
13	Factor de Coreccion de Metano (MCF):	**1.0**	
14	Constante de Indice de generacion de metano para	**0.23**	1/año
15	residuos organicos de decaimiento lento (k):	**0.027**	1/año
16	Indice de generacion final (L_0):	**91.0**	m^3/Mg
17	Residuos organicos de decaimiento rapido L_0:	**67.6**	m^3/Mg
18	Residuos organicos de decaimiento lento L_0:	**189.0**	m^3/Mg

Paso 9: Toneladas dispuestas por año en toneladas métricas (Celda B25 – B125.) Ver Figura 2. Los estimados de disposición deberán ser basados en el historial de disposición del lugar y ser consistente con los datos de depósitos ya en el lugar, capacidad total del relleno y año de clausura. Si el relleno ha tenido varios incendios, se debe descontar un por ciento o cantidad de residuos de los datos históricos y/o calculados de residuos.

- Alimentar los índices de disposición para años con datos históricos.
- Si el historial de disposición es desconocido, ajuste la cantidad de residuos en el año de apertura hasta que la cantidad calculadas de toneladas en el lugar sea igual a la cantidad estimada de toneladas en el lugar (que la cantidad del año más reciente con datos históricos). El índice de crecimiento (Celda B8) se utiliza para calcular la cantidad de residuos para los años sin datos históricos
- El modelo utiliza el crecimiento anual para calcular los índices de disposición futuros. El valor alimentado en la Celda B16 será automáticamente copiado a las celdas inferiores hasta la Celda B76, la cual tiene el valor de cero “0”.
- Alimentar “0” en las celdas que corresponden a los años después del año de clausura. El modelo acepta hasta 101 años de historial de disposición.

Paso 10: Eficiencia del sistema recolección por cada año después de que el sistema ha sido o planea ser instalado (Celda D25 – D125). Ver Figura 2.

- La Hoja de Alimentación presenta 0% de eficiencia del sistema de recolección por los primeros 30 años de operación del relleno sanitario y 60% para los años restantes.
- La eficiencia del sistema de recolección en los años pasados deberá mostrar el estado del sistema de recolección en esos años.
- La eficiencia del sistema de recolección en los años futuros deberá mostrar las estimaciones del sistema de recolección por construir en el futuro.
- La Sección 2.1.1 provee información adicional para estimar la eficiencia del sistema.

Paso 11: Recuperación actual en metros cúbicos por hora (para rellenos sanitarios con sistemas de recolección activos). Alimentar en Celda E16 – E115 (ver Figura 2, para mas detalle) El flujo promedio anual total en la estación de quemado y/o la planta de energía (Este dato no es la suma de los flujos individuales de cada pozo). Ajustar todos los flujos a 50% de metano, multiplicando el flujo medido por el contenido de metano medido en el biogás y luego dividiendo el resultado por 50%. Los números alimentados en estas celdas serán presentados en la hoja de resultados en forma gráfica. Se dejara la celda en blanco para los años en que el flujo fue cero "0".

Ecuación para ajustar el contenido de metano a 50%:

$$\text{Flujo Medido} \times \frac{\text{Contenido de } CH_4 \text{ Medido (\%)}}{\text{Metano 50\%}} = \text{Flujo a 50\% de metano}$$

FIGURA 2. ALIMENTACIÓN DEL MODELO (Continuación)

	A	B	C	D	E
15	Año	Toneladas Métricas Depositadas	Toneladas Métricas Acumuladas	Eficiencia del Sistema de Recolección	Recuperación Actual
16	1991	50,000	50,000	0%	
17	1992	50,000	100,000	0%	
18	1993	50,000	150,000	0%	
19	1994	50,000	200,000	0%	
20	1995	50,000	250,000	0%	
21	1996	50,000	300,000	0%	
22	1997	50,000	350,000	0%	
23	1998	50,000	400,000	0%	
24	1999	50,000	450,000	0%	
25	2000	50,000	500,000	0%	
26	2001	50,000	550,000	60%	280
27	2002	50,000	600,000	60%	300
28	2003	50,000	650,000	60%	320
29	2004	50,000	700,000	60%	
30	2005	50,000	750,000	60%	
31	2006	50,000	800,000	60%	
32	2007	50,000	850,000	60%	
33	2008	50,000	900,000	60%	
34	2009	50,000	950,000	60%	
35	2010	50,000	1,000,000	60%	
36	2011	50,000	1,050,000	60%	
37	2012	50,000	1,100,000	60%	
38	2013	50,000	1,150,000	60%	

2.1.1 Estimación de la Eficiencia del Sistema de Recolección.

La eficiencia del sistema de recolección es medida de la habilidad que tiene el sistema para capturar el gas generado por el relleno sanitario. La eficiencia es el porcentaje aplicado a la proyección de generación de biogás para calcular la cantidad de biogás que puede ser capturado para después ser quemado o utilizado para uso beneficial. A pesar de que la captura de biogás en los rellenos sanitarios puede ser medida, la generación de biogás actual en el relleno no puede ser medida (esta es la razón por la que este modelo para estimar generación existe); debido a esto existe una incertidumbre considerable en cual puede ser la eficiencia de recolección que un sistema puede alcanzar.

En respuesta a la incertidumbre concerniente a la eficiencia del sistema de recolección, la U. S. EPA (EPA, 1998) ha publicado lo que cree son eficiencias razonables para sistemas de recolección instalados en rellenos de los Estados Unidos y que cumplen con los estándares americanos de diseño. De acuerdo con la U. S. EPA, la eficiencia de recolección en estos rellenos típicamente varía entre 60% y 85%, con un promedio de 75%. Un sistema de recolección extenso se define como un sistema de pozos verticales y/o recolectadores

horizontales proveyendo un 100% de cobertura del sistema de recolección en todas las áreas con residuos después de un año de los residuos hayan sido depositados. La mayoría de los rellenos, particularmente los que aun reciben material, tiene menos del 100% de cobertura y requisen un ajuste de "factor de corrección" al estimado de la eficiencia de recolección. Lugares con problemas de seguridad o gran volumen de pepenadores no podrán instalar equipos ni alcanzar una cobertura extensa con el sistema de recolección.

La Tabla 6 – Eficiencia de Recolección en Rellenos Sanitarios muestra un ejemplo demostrando como determinar la eficiencia de recolección usando las características del relleno sanitario y deduciendo porcentajes en rellenos sanitarios que no cuenten con estas características. Por ejemplo, si un relleno sanitario cuenta con todas las características listadas, la eficiencia estimada sería 85%.

TABLA 6: EFICIENCIAS DE RECOLECCION EN RELLENOS SANITARIOS

No.	Característica del Relleno Sanitario	Descuento de Eficiencia de Recolección	
		Rellenos que cumple con algunas características	Rellenos que no cumplen con ninguna característica
1	Disposición controlada de residuos, compactación de material y nivelación	8%	15%
2	Profundidades de al menos 8 m, preferiblemente > 15 m	5%	10%
3	Cubierta diaria aplicada al los residuos dispuestos. Rellenos sanitarios clausurados deberán tener una cubierta final construida en los primeros años de clausura.	5%	10%
4	Cubierta de la plantilla (base) consistiendo de material sintético (plástico) sobre 0.6 metros (2 pies) de arcilla o un material similar.	2%	10%
5	Sistema completo y bien diseñado de recolección de biogás con pozos verticales o recolectores horizontales que tengan una cobertura del 100% e instalado después de algunos años de haberse depositado los residuos.	% de área de disposición sin pozos	
6	Un sistema de recolección de biogás operando eficientemente con todos los pozos de extracción operables y en buen funcionamiento (ejemplo: relativamente libre de líquidos que afecten la extracción del biogás).	% de pozos con mal funcionamiento o con altos niveles de lixiviados	

Notar que el método recomendado para estimar las eficiencias de recolección implican que siempre una porción (mínimo 15%) del biogás generado que se escapara de ser recolectado, independientemente del lo bien diseñado que este el sistema. En seguida se presentan los pasos recomendados para ajustar la eficiencia de recolección:

- La evaluación comienza asumiendo 85% como eficiencia de recolección si el relleno sanitario cumple con las cinco (5) características listadas en la Tabla No.6 y descontando un porcentaje si el relleno no cumple con alguna de las características.

- Se sugiere 15% si el relleno no cumple con la característica No. 1, 10 % o menos si no cumple con la característica Nos. 2 y 3, y 5% o menos por no cumplir con la característica No. 4 (por ejemplo: se descontará 40% si el relleno sanitario no cumple ninguna de las primeras cuatro características, ni aunque sea en parte).

- Para tomar en cuenta la No. 5, el descuento estimado deberá multiplicarse por la cobertura del sistema en la masa de residuos (ver la definición de cobertura del sistema de recolección en el glosario). Algunas sugerencias a considerar para evaluar la cobertura del sistema de recolección son presentadas mas adelante.

- El descuento final (Característica No. 6) involucra la evaluación de la operación del sistema de recolección tomando en cuenta el número de pozos en operación. Esta evaluación deberá considerar el efecto de altos niveles de lixiviados limitando la extracción de biogás. Para determinar si un pozo es o no operable tendrá que ser basada en los datos de monitoreo de los pozos, incluyendo la presión en la cabeza del pozo (la presión deberá ser negativa), los contenidos de metano y oxígeno (contenido de metano por debajo de 40% y contenido de oxígeno mayor de 5% son indicación de que el aire se esta infiltrando en el pozo). Después de tomar en cuenta el funcionamiento de los pozos (ver abajo), se multiplica el porcentaje de pozos en operación por el valor calculado en los pasos anteriores para obtener la eficiencia de recolección.

La importancia de un pozo que no este funcionando bien deberá tomarse en cuenta para estimar el porcentaje de pozos en operación. Por ejemplo: un relleno sanitario con un pozo con problemas en la vecindad de otros pozos que funcionan bien causará un descuento menor que un pozo con problemas que no tenga pozos a su alrededor que ayuden a compensar la falta de este pozo.

La evaluación de la cobertura del sistema de recolección requiere un muy buen grado de familiaridad con el diseño del sistema. El espaciamiento y profundidad son factores muy importantes. A continuación se describen varios escenarios que deben ser considerados:

- Pozos profundos pueden extraer más biogás de volúmenes grandes de residuos comparado con pozos menos profundos, esto es debido a que se les puede aplicar más succión sin que el aire de la superficie se infiltre al sistema.
- Rellenos sanitarios con pozos verticales profundos (mas de 20 metros) pueden recolectar biogás de áreas con una densidad de pozos igual o menor a dos pozos por hectárea.
- Rellenos Sanitarios con pozos menos profundos requerirán mayor densidad de pozos, probablemente mayor a 2 pozos por hectárea para lograr una buena cobertura.
- A pesar de que rellenos sanitarios con una red de pozos densa pueden colectar más biogás que rellenos sanitarios con redes de pozos mas espaciados, los rellenos sanitarios con redes de pozos mas espaciados típicamente colectan más biogás por pozo (debido a la influencia que estos ejercen al volumen de residuos).

2.2 Resultados del Modelo – Tabla

Los resultados del modelo en forma tabular aparecen en la Hoja de Cálculo llamada "Resultados - Tabla" que con pocos cambios estará lista para impresión (ver Figura 3 en la siguiente página). El título de la tabla se ajusta al momento que el usuario alimenta la Hoja de Alimentación. La tabla provee la siguiente información:

- Los años de proyección empiezan con el año de apertura del relleno y terminan con el año que el usuario escoja.
- Índices de disposición anuales.
- Toneladas acumuladas de residuos dispuestas por cada año de proyección.
- Generación de biogás por cada año de proyección en metros cúbicos por hora, pies cúbicos por minuto y millones de unidades de calor británicos por hora (mmBtu/hr).
- Eficiencia del sistema de recolección por año de proyección.
- Recuperación de biogás por cada año de proyección en metros cúbicos por hora, pies cúbicos por minuto y millones de unidades de calor británicos (mmBtu/hr).
- Capacidad máxima de una planta de energía en megavatio (MW)
- Índice de recuperación línea base de flujo de biogás en metros cúbicos por hora
- Reducción estimada de emisiones de metano en tonnes CH_4/año y en tonne CO_2/año
- El contenido de metano utilizado en el modelo (in la mayoría de los casos será 50%).
- El valor de k utilizado por el modelo.
- El Valor de L_0 utilizado por el modelo.

La tabla esta programada para presentar hasta 100 años de generación y recuperación de biogás. La tabla muestra 53 años de información, los 47 años restantes están ocultos. Dependiendo de la edad del relleno sanitario y de los años que le quedan de vida útil, el usuario querrá cambiar el número de año de la información mostrada. Usualmente, las proyecciones hechas hasta el año 2030 serán adecuadas para la mayoría de los casos. Para ocultar renglones no necesarios. El usuario deberá seleccionar los renglones por ocultar, seleccionar del menú principal "Formato o Format," luego "Renglón-Row," y finalmente "Ocultar o Hide". Para mostrar los reglones ocultos el usuario deberá seleccionar los renglones inmediatos arriba y debajo de los renglones ocultos, seleccionar del menú principal "Formato o Format," luego "Renglón-Row," y finalmente "Mostrar o Unhide".

Para imprimir la tabla seleccionar del menú principal "Archivo-File" y luego "Imprimir o Print" La tabla deberá imprimir correctamente.

FIGURA 3. EJEMPLO DE LA HOJA DE RESULTADOS - TABLA

TABLA 1
PROYECCIONES DE GENERACION Y RECUPERACION DE BIOGAS
NOMBRE DEL RELLENO, CIUDAD, PAIS

Año	Indice de Disposición (Mg/año)	Residuos Acumulados (Mg)	Generación de Biogás (m^3/hr)	Generación de Biogás (cfm)	Generación de Biogás (mmBtu/hr)	Eficiencia del Sistema de Recolección (%)	Recuperación de Biogás del Sistema Planeado (m^3/hr)	Recuperación de Biogás del Sistema Planeado (cfm)	Recuperación de Biogás del Sistema Planeado (mmBtu/hr)	Capacidad Maxima Planta de Energia* (MW)	Flugo de Biogas Linea Base (m^3/hr)	Estimados de Reduccion en Emisions de Metano** (tonnes CH_4/año)	Estimados de Reduccion en Emisions de Metano** (tonnes CO_2eq/año)
1978	175,000	175,000	0	0	0.0	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1979	179,000	354,000	380	224	6.8	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1980	183,000	537,000	701	413	12.5	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1981	187,000	724,000	975	574	17.4	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1982	191,000	915,000	1,211	713	21.6	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1983	195,000	1,110,000	1,417	834	25.3	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1984	199,000	1,309,000	1,599	941	28.6	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1985	203,000	1,512,000	1,762	1,037	31.5	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1986	207,000	1,719,000	1,910	1,124	34.1	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1987	211,000	1,930,000	2,046	1,204	36.6	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1988	215,000	2,145,000	2,172	1,279	38.8	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1989	219,000	2,364,000	2,291	1,348	40.9	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1990	223,000	2,587,000	2,404	1,415	43.0	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1991	227,000	2,814,000	2,511	1,478	44.9	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1992	232,000	3,046,000	2,615	1,539	46.7	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1993	237,000	3,283,000	2,718	1,600	48.6	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1994	242,000	3,525,000	2,820	1,660	50.4	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1995	247,000	3,772,000	2,922	1,720	52.2	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1996	252,000	4,024,000	3,023	1,779	54.0	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1997	257,000	4,281,000	3,124	1,839	55.8	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1998	262,000	4,543,000	3,224	1,898	57.6	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
1999	267,000	4,810,000	3,325	1,957	59.4	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2000	272,000	5,082,000	3,425	2,016	61.2	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2001	277,000	5,359,000	3,526	2,075	63.0	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2002	283,000	5,642,000	3,626	2,134	64.8	0%	0	0	0.0	0.0	0	0	0
2019	0	7,147,000	1,425	839	25.5	60%	855	503	15.3	1.4	0	2,681	56,310
2026	0	7,147,000	1,048	617	18.7	60%	629	370	11.2	1.0	0	1,972	41,419
2027	0	7,147,000	1,013	596	18.1	60%	608	358	10.9	1.0	0	1,906	40,020
2028	0	7,147,000	980	577	17.5	60%	588	346	10.5	1.0	0	1,844	38,719
2029	0	7,147,000	949	559	17.0	60%	569	335	10.2	0.9	0	1,786	37,501
2030	0	7,147,000	920	542	16.4	60%	552	325	9.9	0.9	0	1,731	36,354

PARAMETROS DE ALIMENTACION				
Contenido de Metano	50%	MCF:	1.0	
	Decaimiento Rapido	Decaimiento Lento	Lo total de Lugar	
Constante de Generacion de Metano (k)	0.230	0.027		
Potencial de Generacion de Metano (Lo) (m3/M	68	189	91	

NOTAS

* Se asumio que maxima capacidad de planta de energia sera de 10,800 Btus por kW-hr (hhv) de indice de calor bruto

**Reduccion de emisiones no incluye generación de electricidad, asume una fecha de arranque de 1 de enero del 2008 y fue calculada usando un densidad de metano (a temperature y presion estandarizada) de 0.000716 Mg/m3.

Page 1

2.3 Hoja de Resultados – Gráfica

El Modelo provee resultados en forma gráfica en la Hoja de Resultados – Gráfica (ver Figura 4). Los datos mostrados en la gráfica son los siguientes:

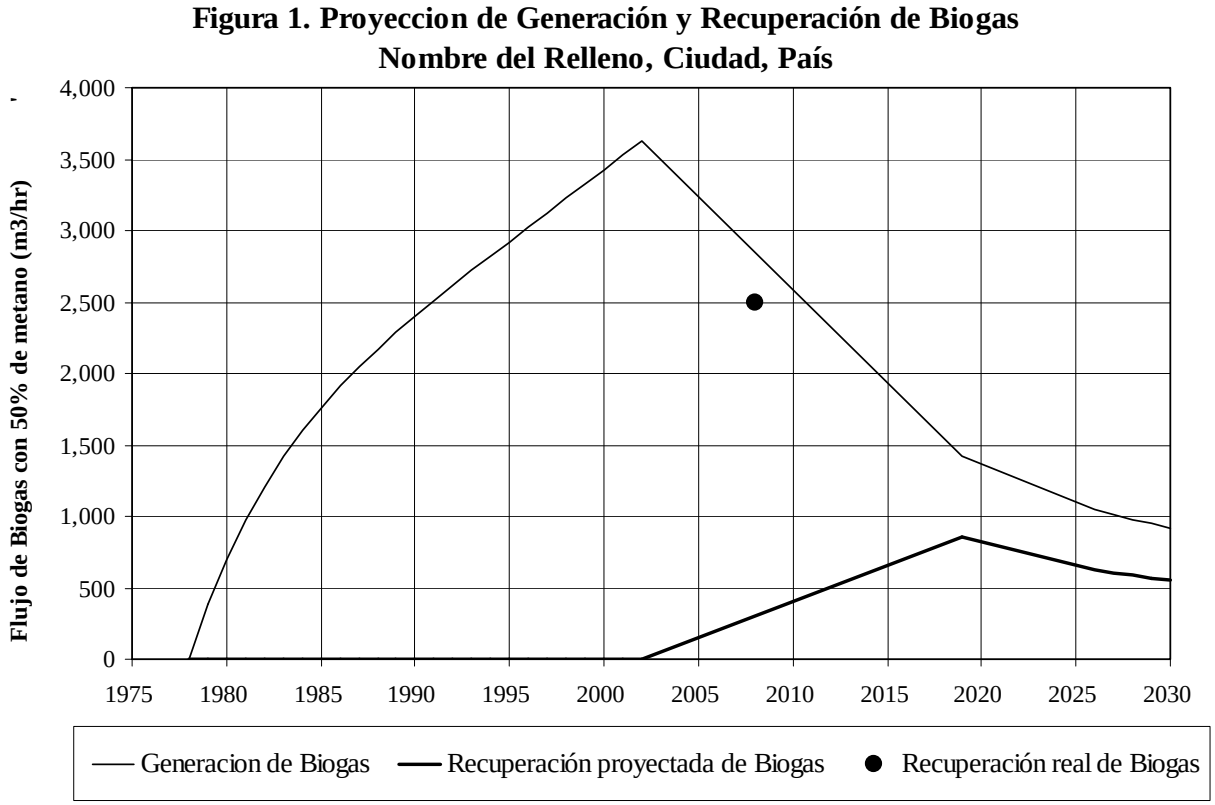
- Generación de biogás para cada año de proyección en metros cúbicos por hora.
- Recuperación de biogás por cada año de proyección en metros cúbicos por hora.
- Datos actuales de recuperación (historial) en metros cúbicos por hora.

El título de la gráfica necesitará ser editado tal y como se expresa en la nota que se encuentra debajo de la gráfica. Si el usuario no quiere mostrar la proyección hasta el 2030, el eje “x” necesitara edición. Para editarlo, el usuario deberá seleccionar el eje “x” en la gráfica y luego seleccionar “Formatear o Format” y luego “eje-x o x-axis”. Una vez la ventana de Formato este abierta. Seleccionar el tabulador de “Escala o Scale” para modificar los limites del eje x. También, debido a que la gráfica esta enlazada a la tabla, la gráfica mostrará los años de

proyección que la tabla muestre (dados los limites del eje x). No mostrará ninguno de los renglones ocultos. Si la tabla muestra años fuera del rango del eje x, la línea de la gráfica se extenderá fuera de los límites de la gráfica. Para corregir esto, el usuario deberá ocultar los renglones extras o editar el rango del eje x para mostrar los años adicionales.

Para imprimir la gráfica, seleccionar la gráfica y luego seleccionar del menú principal “Archivo o File”, luego Imprimir o Print”. Si el usuario no selecciona la gráfica antes de imprimir, la nota debajo de la gráfica también aparecerá en la impresión.

FIGURA 4. EJEMPLO DE LA HOJA DE RESULTADOS - GRAFICA



3.0 REFERENCIAS

EPA, 1991. Regulatory Package for New Source Performance Standards and III(d) Guidelines for Municipal Solid Waste Air Emissions. Public Docket No. A-88-09 (proposed May 1991). Research Triangle Park, NC. U.S. Environmental Protection Agency.

EPA, 1998. Compilation of Air Pollutant Emission Factors, AP-42, Volume 1: Stationary Point and Area Sources, 5th ed., Chapter 2.4. Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, NC. U.S. Environmental Protection Agency.

EPA, 2005. Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide. EPA-600/R-05/047 (May 2005), Research Triangle Park, NC. U.S. Environmental Protection Agency.

IPCC, 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Volume 5 (Waste), Chapter 3 (Solid Waste Disposal), Table 3.1.

UNFCCC, 2006. Revision to the approved baseline methodology AM0025,"Avoided from organic waste through alternative waste treatment processes." United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), 03 March 2006.